

APLICACIÓN DEL ÍNDICE DE PALMER PARA EL ANÁLISIS DE LA SEQUÍA EN ANDALUCÍA

J. D. del Pino⁽¹⁾, M.F. Pita⁽²⁾, L. García Barrón⁽³⁾

⁽¹⁾ AEMET, Delegación T. Andalucía, C. M., Av Américo Vespuccio 3 bajo, 41072 Sevilla, jdelpino@inm.es

⁽²⁾ Dpt. de Geografía Física y AGR. Universidad de Sevilla, C. D^a M^a de Padilla s/n, 41004 Sevilla, mapita@us.es

⁽³⁾ Dpt. de Física Aplicada II. Universidad de Sevilla, Av. Reina Mercedes 4^a, 41012 Sevilla, leoncio@us.es

Resumen

El término sequía está íntimamente relacionado con la carencia o deficiencia de precipitaciones, pero no es la única variable que la determina. La capacidad de almacenaje y pérdida de humedad del suelo son también variables muy influyentes en las condiciones de sequía. En concreto en la región andaluza, objeto principal de este trabajo, las condiciones de temperatura, generalmente altas y a veces extremas, influyen enormemente a través de la evapotranspiración en la disipación o pérdida de las precipitaciones registradas. El Índice de Palmer, en sus diversas versiones, ampliamente utilizado en Estados Unidos, es adecuado para analizar y cuantificar las condiciones de sequía en Andalucía, donde en varias ocasiones se ha apuntado la necesidad de disponer de un mecanismo operacional de monitorización del estado de sequía.

El último informe del IPCC pronostica unas condiciones climáticas futuras para el sur de la Península Ibérica en las que las sequías serán más frecuentes y duraderas, lo que implica una mayor necesidad de estudios acerca de la sequía y del establecimiento de mecanismos de alerta.

El objetivo de este trabajo es verificar la adaptación del Índice de Palmer al territorio andaluz, para lo cual se ha aplicado el índice a los observatorios de la red sinóptica principal de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) en Andalucía, durante el periodo 1951 a 2009.

Metodología

El objetivo principal de este trabajo es verificar la adaptación del Índice de Palmer al territorio andaluz, para lo cual se ha aplicado el índice a 44 observatorios de Andalucía, durante el período 1951-2009 con datos de Precipitación Acumulada Mensual y Temperatura Media Mensual, para lo que es necesario que los observatorios tengan datos diarios de Precipitación y Temperaturas Máxima y

Mínima. Puesto que el periodo a estudiar es de (2009-1951+1) 49 años, se han seleccionado las que tengan al menos 40 años de estas tres magnitudes, resultando en tal caso 44 observatorios, de los que habrá que excluir 4 que ya no están abiertos, quedando finalmente 40.

Este trabajo no incluye un verdadero análisis de distribución espacial del Índice de Palmer en la comunidad andaluza. No obstante, sí se analiza el impacto que sobre el índice pueda tener las diferentes características geográficas. Así, en los resultados que se presentan en este trabajo, se han elegido entre los 40 observatorios, aquellos con series lo más completas posibles y que a la vez sean representativos de las características geográficas más definidas en la región andaluza, es decir, campiña, zona de media montaña y cercanía al mar, resultando finalmente los tres observatorios que se especifican en la tabla 1.

Observatorio	Característica geográfica
Sevilla (Apto)	Campiña
Málaga (Apto)	Litoral
Pozoblanco (Córdoba)	Montaña

Tabla 1.- Observatorios seleccionados para la aplicación del Índice de Palmer en Andalucía, representativos de 3 características geográficas diferentes.

Para los tres observatorios anteriores sus series diarias de precipitación son completas; sin embargo contienen algunas lagunas en las series de temperaturas. Las rupturas son puntuales o de un conjunto pequeño de datos, por lo que la interpolación se hace, cuando se realiza el cálculo de la temperatura media mensual, que será la serie de trabajo. Por carecer de lagunas no ha habido ningún problema en calcular la serie de precipitación acumulada mensual.

Para el cálculo del Índice de Palmer y para facilitar la interpretación de los resultados, se ha diseñado un software propio, que cumple estos requisitos. Este software ha sido desarrollado en *Visual Basic*, lo que

ha permitido presentar gráficamente de forma inmediata los resultados finales e intermedios del cálculo de Índice de Palmer. Las gráficas que aparecen en este trabajo son proporcionadas por esta aplicación.

Cálculo del Índice de Palmer

El Índice de Palmer PDSI (*Palmer Drought Severity Index*) fue uno de los primeros índices para identificar y cuantificar la severidad de las sequías, con independencia de la zona climática a tratar, es decir, el objetivo de Palmer es obtener un indicador que permita comparar el estado de la sequía para diferentes zonas y periodos. Los cálculos de Palmer no se basan solo en la valoración de la precipitación, sino en un modelo de balance de humedad en el suelo. Concretamente se basa en el análisis de la diferencia entre la precipitación real y la precipitación necesaria para mantener el balance de humedad del suelo en sus condiciones normales. No es un mero balance hídrico, que nos señalaría que Andalucía es una región con cierto grado de aridez, sobre todo en algunas comarcas orientales, sino que analiza si, periodo a periodo, en nuestro caso mes a mes, las condiciones de humedad son las esperadas. Además no solo depende de la comparación entre el contenido real y el climatológicamente esperado de humedad del mes en cuestión.

Para Palmer la magnitud representativa de las condiciones de humedad del suelo, como en tantos otros índices, es la precipitación registrada, pero difiere de otros autores en el momento de establecer la anomalía, pues no la comparará con la precipitación media o mediana del mes en cuestión, sino con la precipitación $\langle P_t \rangle$ que el denomina CAFEC (*climatically appropriate for existing conditions*). Por tanto, la anomalía pluviométrica no solo depende de valor real de precipitación registrado y del climatológicamente esperado en el mes en cuestión, sino también con las condiciones de humedad de los meses precedentes. Así pues, establece como valor para la anomalía mensual, la expresión recogida en la siguiente ecuación:

$$d_t = P_t - \langle P_t \rangle \quad (1)$$

Este requerimiento de humedad $\langle P_t \rangle$, evaluado mes a mes durante todos los años del episodio, puede obtenerse mediante el balance de agua del suelo, que viene determinado por la evapotranspiración CAFEC $\langle ET_t \rangle$, la recarga del suelo CAFEC $\langle R_t \rangle$ y la escorrentía $\langle RO_t \rangle$ CAFEC. Para satisfacer estos requerimientos de humedad, la precipitación registrada contaría con aportaciones precedentes de la reserva de agua del suelo, por lo que a estos requerimientos hay que restarle la pérdida de agua del suelo CAFEC $\langle L_t \rangle$, resultado pues la expresión:

$$\langle P_t \rangle = \langle ET_t \rangle + \langle R_t \rangle + \langle RO_t \rangle - \langle L_t \rangle \quad (2)$$

Cada uno de estas magnitudes CAFEC se calculan a partir de los valores potenciales ponderados por unos pesos que reflejan las características climatológicas de la zona y periodo en cuestión.

$$\langle P_t \rangle = \alpha_i PE_t + \beta_i PR_t + \gamma_i PRO_t - \delta_i PL_t \quad (3)$$

Donde estos pesos, denominados coeficientes del balance de agua son la relación entre los valores medios reales y potenciales de cada una de las magnitudes que intervienen en el balance de agua, obtenidos por las expresiones siguientes:

$$\begin{aligned} \alpha_i &= \overline{ET_t} / \overline{PE_t} & \beta_i &= \overline{R_t} / \overline{PR_t} \\ \gamma_i &= \overline{RO_t} / \overline{PRO_t} & \delta_i &= \overline{L_t} / \overline{PL_t} \end{aligned} \quad (4)$$

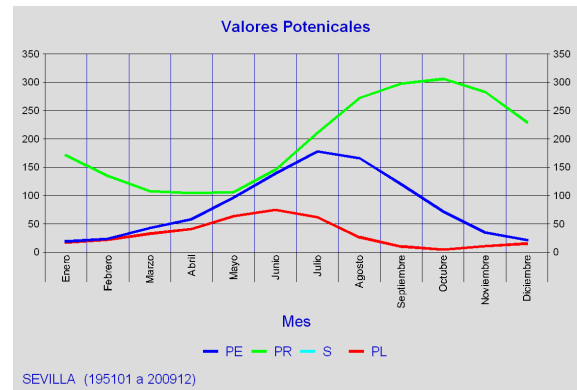


Fig. 1.- Media mensual para el periodo 1951/01-2009/12 en el observatorio del Aeropuerto de Sevilla (AEMET) de los valores potenciales del balance de agua en el suelo: evapotranspiración potencial (PE), recarga potencial del suelo (PR), agua contenida en el suelo al inicio del mes (S), como medida de la escorrentía potencial, y la pérdida potencial (PL) del agua del suelo.

La figura 1 muestra el cálculo de los valores medios mensuales para las variables que aparecen en el balance de agua del suelo. Estos valores proceden de promediar para cada mes las aportaciones potenciales de estas magnitudes en el balance de agua del suelo. La evapotranspiración potencial es estimada usando el método de Thornthwaite (Thornthwaite 1948).

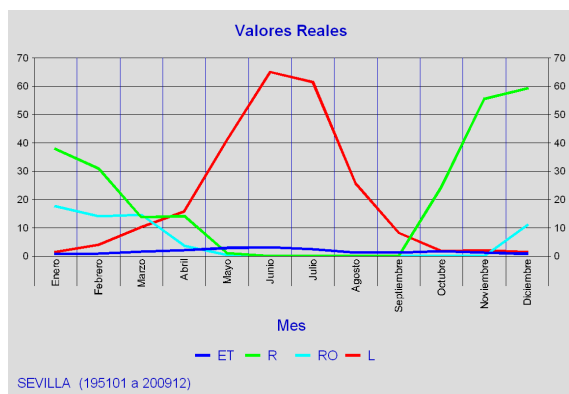


Fig. 2.- Media mensual para el período 1951/01-2009/12 en el observatorio del Aeropuerto de Sevilla (AEMET) de los valores reales que intervienen en el balance de agua en el suelo: evapotranspiración (ET), recarga (R), escorrentía (RO) y la pérdida (L) del agua del suelo.

La figura 2 muestra el cálculo de los valores medios mensuales para los variables que aparecen en el balance de agua del suelo. Estos valores proceden de promediar para cada mes las aportaciones reales de estas magnitudes en el balance. Y son posteriores al cálculo de las respectivas magnitudes potenciales. La figura 3 representa los coeficientes del balance del agua, que son obtenidos mediante la ecuación 4.

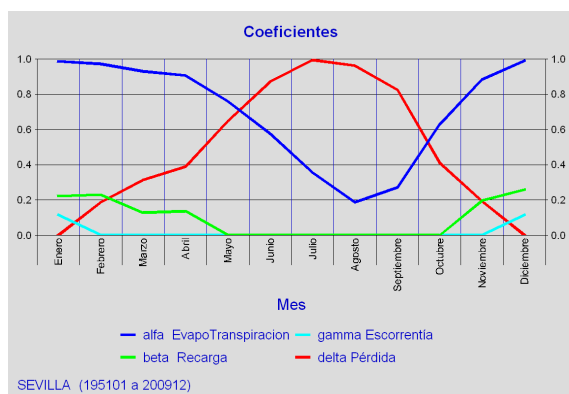


Fig. 3.- Para el período 1951/01-2009/12 en el observatorio del Aeropuerto de Sevilla (AEMET) se representan los coeficientes mensuales para el balance de agua: para la evapotranspiración (α_i), la recarga (β_i), la escorrentía (γ_i) y la pérdida de agua (δ_i), obtenidos a partir de las ecuaciones (4).

El proceso para obtener estos desvíos d_i para cada uno de los meses de la serie, comienza con el cálculo de los valores potenciales para cada uno de los miembros del balance de agua en el suelo. Seguidamente se calculan los valores reales de estas cuatro magnitudes. Se calculan los valores medios mensuales y de sus cocientes se obtienen los coeficientes, que multiplicados por los valores potenciales para cada elemento de la serie, permiten obtener la precipitación CAFEC y finalmente los desvíos. Sin embargo, estos desvíos no son comparables entre sí dentro de una misma serie, pues representan periodos climáticamente diferentes. Tampoco son comparables con los valores obtenidos

para otras zonas, en definitiva, requieren un tratamiento para eliminar la dependencia espacial y temporal. Palmer soluciona este problema aplicándoles un factor de ponderación, K_i , obtenido empíricamente y que responde a las ecuaciones (6) y (7), diferentes para cada uno de los 12 meses del año y para cada observatorio.

$$Z_t = d_t K_i \quad (5)$$

con

$$K_i = \frac{17.67}{\sum_{j=1}^{12} \overline{D_j} K'_j} K'_i \quad (6)$$

y

$$K'_i = 1.5 \log_0 \left(\frac{\frac{\overline{PE_i} + \overline{R_i} + \overline{RO_i}}{\overline{P_i} + \overline{L_i}} + 2.8}{\overline{D_i}} \right) + 0.5 \quad (7)$$

La figura 4 muestra los resultados medios mensuales, de D_i , K_i y K'_i , necesarios para el cálculo de estas ponderaciones según se ve en las ecuaciones (6) y (7).

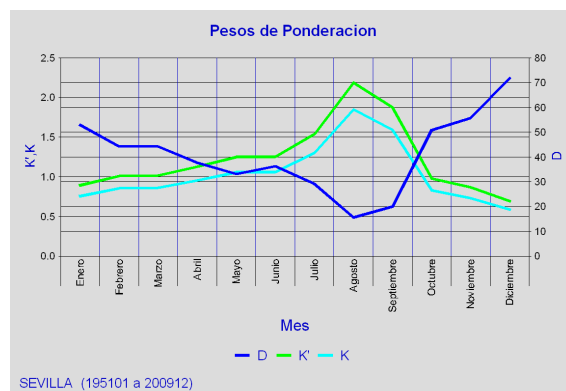


Fig. 4.- Para el observatorio del Aeropuerto de Sevilla (AEMET) se representan los coeficientes D_j , K_i y K'_j , necesarios, según las ecuaciones (5) y (6), para permitir comparar el índice de Palmer entre periodos y características geográficas diferentes.

El proceso de cálculo del Índice de Palmer, al igual que en para otros índices, culmina con la acumulación de los desvíos. Sin embargo, Palmer no se limita a la simple suma de los desvíos ponderados Z_t , sino que el valor de PDSI para un elemento de la serie X_t se obtiene sumándole al 89.7% del valor anterior un tercio de la desviación ponderada del periodo, según se indica en la ecuación (8)

$$X_t = 0.897 X_{t-1} + (1/3) Z_t \quad (8)$$

Los valores 0.897 y 1/3, denominados factores de duración, los obtiene Palmer empíricamente a partir de datos de dos observatorios (Kansas y Iowa, en el este y centro de EEUU, respectivamente), agrupando en varias categorías los de igual intensidad en Z_t pero distinta duración, reflejando la ecuación (5) la frontera entre estas categorías. Finalmente las clasifica, en función del valor de PDSI, en las clases indicadas en la tabla 1.

PDSI (X_t)	
Valores	Categorías
≥ 4	Secuencia húmeda extrema
3.00 a 3.99	Secuencia húmeda severa
2.00 a 2.99	Secuencia húmeda moderada
1.00 a 1.99	Secuencia húmeda suave
0.50 a 0.99	Secuencia húmeda incipiente
0.49 a -0.49	Condiciones normales
-0.50 a -0.99	Sequía incipiente
-1.00 a -1.99	Sequía suave
-2.00 a -2.99	Sequía moderada
-3.00 a -3.99	Sequía severa
$-4.00 \leq$	Sequía extrema

Tabla 1.- Categorización del Índice de Palmer

Para resaltar más aún cada uno de los estados de una sequía, Palmer aplica la fórmula (8) para tres tipos de secuencias:

- X_{t3} si la secuencia, ya sea seca o húmeda, se encuentra bien establecida, lo que significa que, en valor absoluto, $X_{t3} \geq 1$.
- X_{t1} si se trata de una secuencia húmeda incipiente, lo que significa que su valor está comprendido entre 0 y 1
- X_{t2} para secuencias secas incipientes, con valores comprendidos entre -1 y 0.

De estos tres valores, eligiendo el más adecuado en función de las condiciones presentes, Palmer compone la serie X_t .

Resultados

La figura 5 muestra el comportamiento del Índice de Palmer para el periodo comprendido entre enero de 1951 y diciembre de 2009 en el observatorio de AEMET en el aeropuerto de Sevilla. Esta gráfica perfila perfectamente las secuencias secas y húmedas del periodo, destacando la nitidez de la separación de cada secuencia. En total aparecen 47 secuencias, de las que 23 son secas y 22 son húmedas.

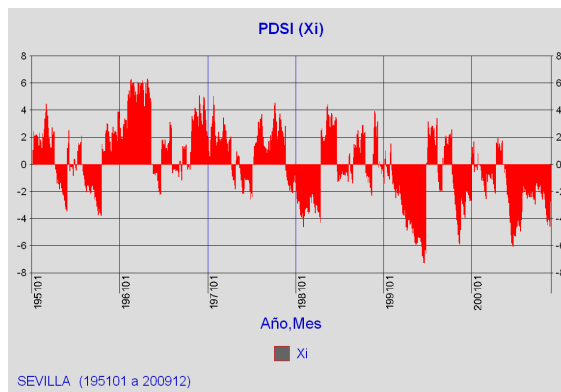


Fig. 5.- Índice de Palmer (PDSI) obtenido para cada mes durante el período 1951/01-2009/12 y en el observatorio del Aeropuerto de Sevilla (AEMET).

El 65% de la amplitud temporal del periodo de estudio está formado por secuencias secas (6 casos) o húmedas (5 casos) muy bien definidas y con una duración igual o superior a los 2 años. En la figura 6 puede verse como este porcentaje sube al 81% del periodo, cuando se consideran secuencias de duración superior al año. Estos altos porcentajes evidencian una característica de la variabilidad del clima en el suroeste peninsular, oscilando a menudo entre dos estados pluviométricos antagónicos, muy alejados de una distribución más uniforme de la frecuencia y abundancia de las precipitaciones, donde las precipitaciones se alejan frecuentemente de sus valores acumulados anuales medios.

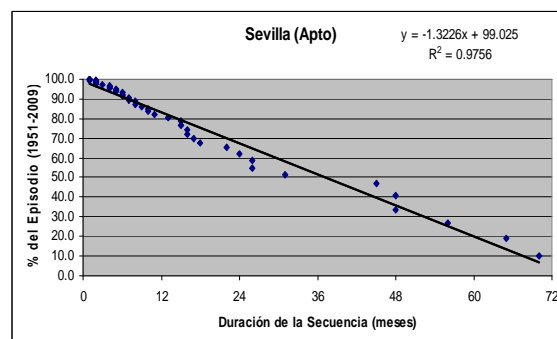


Fig. 6.- Porcentaje del episodio (1951-2009) en función de la duración de las secuencias. Aeropuerto de Sevilla (AEMET).

Las intensidades media y máxima de estas 47 secuencias guardan entre sí una estrecha relación, que se plasma en la figura 7, donde se relaciona linealmente ambas magnitudes, encontrando un coeficiente de correlación del 0.9927

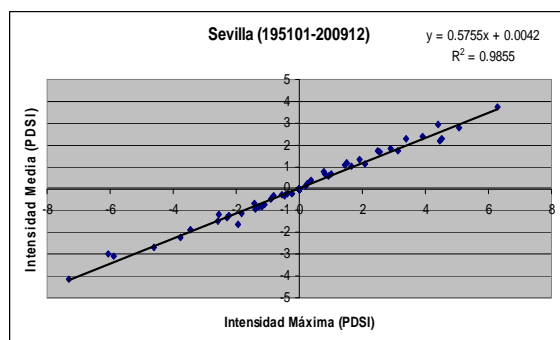


Fig. 7.- Relación entre la Intensidad Media y Máxima del Índice de Palmer (PDSI) para cada una de las secuencias secas (PDSI negativo) y húmedas (PDSI positivo). Los datos de PDSI son mensuales, obtenidos durante el período 1951/01-2009/12 en el observatorio del Aeropuerto de Sevilla (AEMET)

Más relevante aún es la relación que guardan las intensidades media y máxima (figura 8 y 9) de cada secuencia con su duración, arrojando estas relaciones unos coeficientes de correlación de 0.8954 y 0.9217, respectivamente.

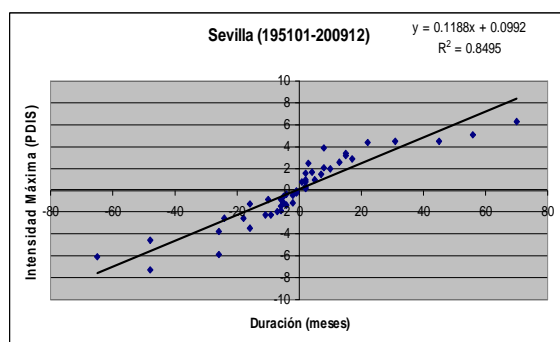


Fig. 8.- Relación entre la Intensidad Máxima del Índice de Palmer (PDSI) para una secuencia y su duración. Los datos de PDSI son mensuales, obtenidos durante el período 1951/01-2009/12 en el observatorio del Aeropuerto de Sevilla (AEMET)

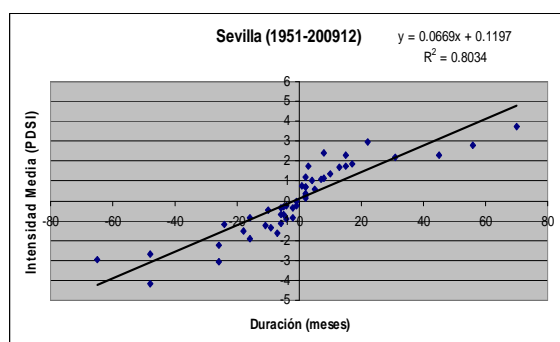


Fig. 9.- Relación entre la Intensidad Media del Índice de Palmer (PDSI) de una secuencia y su duración. Los datos de PDSI son mensuales, obtenidos durante el período 1951/01-2009/12 en el observatorio del Aeropuerto de Sevilla (AEMET)

La tabla 2 presenta las secuencias secas más relevantes, ordenadas de mayor a menor según su duración.

Fecha Inicio	Duración (meses)	Intensidad Máxima	Intensidad Media
200408	65	-6.06	-2.98
199111	48	-7.29	-4.15
197911	48	-4.62	-2.70
195610	26	-3.77	-2.22
199810	26	-5.89	-3.00
200110	24	-2.54	-1.17

Tabla 2.- Secuencias secas más importantes, según el Índice de Palmer (PDSI) en el observatorio de Aeropuerto de Sevilla (AEMET) durante el periodo 1951-2009.

Sequía 2004 a 2009 en Sevilla

La sequía que comenzó en agosto de 2004 y finalizó en noviembre de 2009 fue la de mayor duración, con 5 años y 5 meses, una intensidad máxima en septiembre de 2005 según el índice de Palmer de -6.06, es decir, sequía extrema y una intensidad media de -2.98, es decir, sequía moderada. La figura 10 muestra con más detalle el perfil de esta prolongada sequía.

Llama la atención que esta prolongada secuencia seca comience en agosto, un mes donde las precipitaciones, al igual que en los 2 precedentes, son poco significativas. No obstante, esto sería así para un índice de sequía que solo tenga en consideración la precipitación, que no es el caso. Aún cuando en agosto el balance pluviométrico interanual es positivo (+126.1 mm), el índice de Palmer advierte ya en agosto, que el balance de agua del suelo señala ya el comienzo de una secuencia seca. Agosto de 2004, fue un mes singular en las temperaturas, con una secuencia de 15 días con máximas por encima de los 40°C registradas en el aeropuerto de Sevilla, salvo un día que descendió a los 39.7°C. Estas altas temperaturas de agosto, junto con las también elevadas de junio y julio precedentes, merman, sobre todo por la alta evapotranspiración, las reservas del suelo.

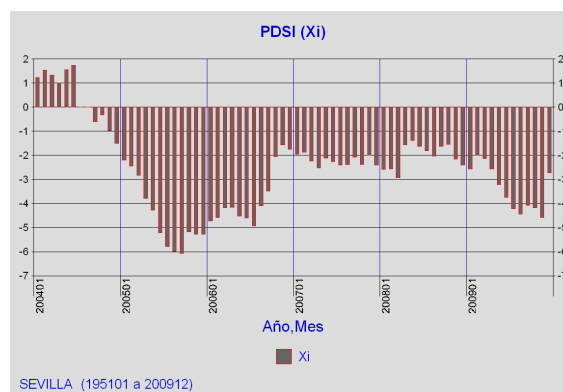


Fig. 10.- Comportamiento del Índice de Palmer (PDSI) en la sequía 2004 a 2009 en el Observatorio del Aeropuerto de Sevilla (AEMET).

Sequía 1991-1995 en Sevilla.

La sequía más intensa fue la que comenzó en noviembre de 1991 y se prolongó hasta octubre de 1995, con una duración de 4 años, una intensidad máxima según PDSI de -7.29 y una intensidad media de -4.15. Supera en intensidad a la sequía 2004-2009. La figura 11 señala su perfil.

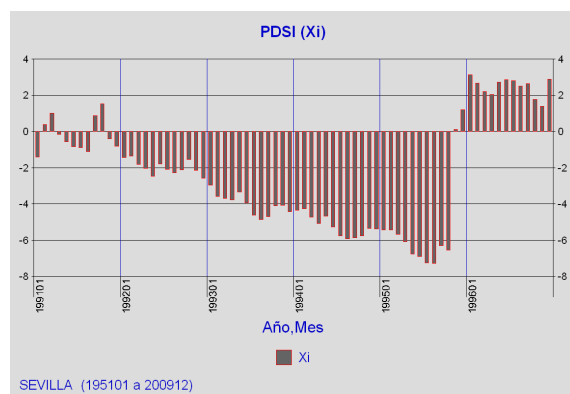


Fig. 11.- Comportamiento del Índice de Palmer (PDSI) en la sequía 1991 a 1995 en el Observatorio del Aeropuerto de Sevilla (AEMET).

En este caso, la sequía, que comienza en noviembre, tiene un origen claramente en la escasez de precipitaciones, aunque el balance pluviométrico interanual ya es negativo desde agosto de 1991.

Respecto a la influencia que pueda tener en los resultados el aplicar el Índice de Palmer a otros observatorios con entorno geográfico diferente se analizan a continuación el comportamiento del PDSI en Pozoblanco el norte de la provincia de Córdoba con una clara influencia orográfica, pues se encuentra en Sierra Morena. También se compararán los resultados obtenidos para el Aeropuerto de Sevilla, dentro de la campiña del valle del Guadalquivir, con los cálculos para el Observatorio de Málaga, de clara influencia marítima.

El periodo 1951-2009 presenta en Pozoblanco un total de 64 secuencias, claramente la mitad secas y la otra mitad húmedas. En Málaga las secuencias para este mismo periodo son 69, ambas muy similares, pero algo mayores que las 47 secuencias en que se divide el periodo en Sevilla. La razón de esta discrepancia se explica por que en Sevilla las precipitaciones proceden sobre todo de la entrada por el valle, con flujo marcado del suroeste, de las borrascas atlánticas y en primavera y otoño por la llegada de DANAS (Depresiones Aisladas en Niveles Altos), generadas en muchas ocasiones en el Golfo de Cádiz, esto le confiere una variabilidad climática en el régimen pluviométrico que determina esas 47 secuencias. Pozoblanco en Sierra Morena, cuenta solamente con estos dos ingredientes, al margen de una mayor actividad tormentosa, pero es

sobre todo su mayor desplazamiento al norte y su elevación geográfica, lo que hace que un mismo frente que es poco activo en Sevilla, deja precipitaciones más importantes en Pozoblanco. Para el caso de Málaga, los frentes asociados dejan menos variabilidad en las precipitaciones, sin embargo esto es compensado por las precipitaciones debidas a las masas que con flujo marítimo convergen en el litoral. Sí son importantes las aportaciones a la variabilidad en las precipitaciones de las DANAS, que suelen ser más activas cuando llegan a las aguas más cálidas del Mediterráneo.

Sequía 2004 a2009 en Pozoblanco (Córdoba).

La tabla 3 señala que para Pozoblanco la sequía de 2004 tuvo una menor duración, solo 22 meses. Sin embargo la sequía, según puede verse en la figura 12, continuó hasta finales de 2009, aunque con cuatro interrupciones. Esto es así, pues el episodio 2004-2009 ha estado caracterizado por la alternancia de periodos con escasas precipitaciones, pero interrumpidos por abundantes precipitaciones puntuales (107.9 mm en mayo de 2004, 153.2 en noviembre de 2004, 156.1 en noviembre de 2006, 124.7 en abril de 2007, 154.5 en abril de 2008 y 127.1 mm en noviembre de 2008). Estas precipitaciones, muchas primaverales tienen su origen en la presencia de DANAS, que orográficamente se activan al llegar a la sierra, aunque no hay que despreciar las lluvias frontales siempre más frecuentes y abundantes en las sierras y cuanto más al norte.

Sequía 1991 a1995 en Pozoblanco (Córdoba).

La sequía de 1991-1995 tiene idénticas características a las encontradas para Sevilla, tanto en duración e intensidades máximas y medias. En este caso hay pocas diferencias pues se trata de una sequía muy bien definida sin repuntes debido a precipitaciones ocasionales de diverso origen.

Fecha Inicio	Duración (meses)	Intensidad Máxima	Intensidad Media
199104	-55	-6.94	-3.39
197911	-48	-5.13	-3.04
198505	-26	-2.53	-1.41
195610	-26	-3.64	-1.79
200411	-21	-5.58	-3.48
196702	-21	-2.8	-1.52

Tabla 3.- Secuencias secas más importantes, según el Índice de Palmer (PDSI) en el observatorio de Pozoblanco en la provincia de Córdoba (AEMET) durante el periodo 1951-2009.

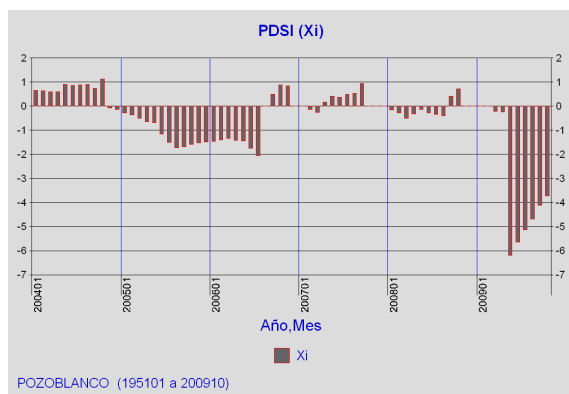


Fig. 12.- Comportamiento del Índice de Palmer (PDSI) en la sequía 2004 a 2009 en el Observatorio Pozoblanco de Córdoba (AEMET).

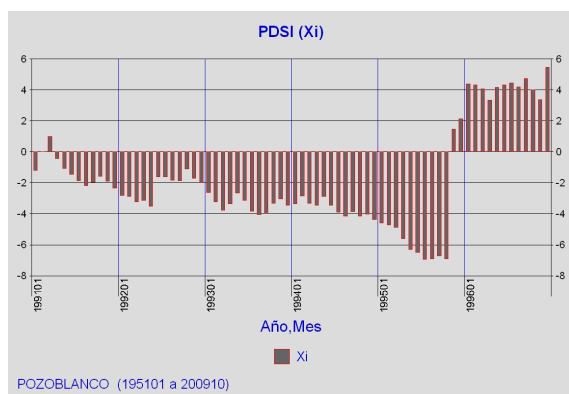


Fig. 13.- Comportamiento del Índice de Palmer (PDSI) en la sequía 1991 a 1995 en el Observatorio de Pozoblanco de Córdoba (AEMET).

Sequías 1991-1995 y 2004-2009 en Málaga.

En Málaga el Índice de Palmer mantiene a la sequía de 1991-1995 como una de las más importantes, con idénticas características a las encontradas tanto en la campiña sevillana como en la Sierra Morena cordobesa. Sin embargo, a diferencia de Pozoblanco, pero coincidiendo con Sevilla la sequía de 2004-2009 es la de más larga duración, con ninguna interrupción, pues aquí los frentes que no llegaron a Sevilla tampoco lo hicieron a Málaga.

La tabla 4 y las figuras 12 y 13 sintetizan las características del índice de Palmer para el análisis de las sequías en Málaga.

Fecha Inicio	Duración (meses)	Intensidad Máxima	Intensidad Media
200409	-64	-5.07	-2.39
199009	-63	-6.72	-2.78
199809	-53	-4.81	-3.21
196511	-27	-3.25	-2.23
198412	-22	-3.79	-2.31

Tabla 4.- Secuencias secas más importantes, según el Índice de Palmer (PDSI) en el observatorio del Aeropuerto de Málaga (AEMET) durante el periodo 1951-2009.

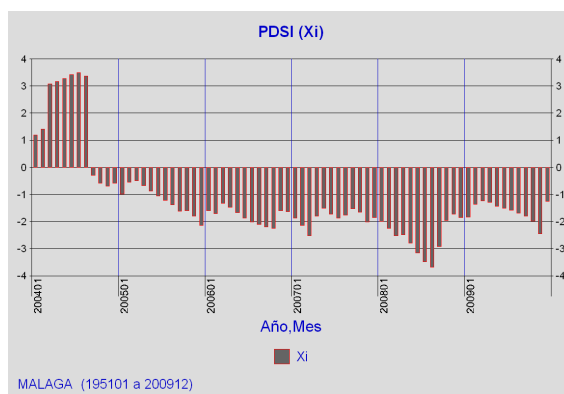


Fig. 13.- Comportamiento del Índice de Palmer (PDSI) en la sequía 2004 a 2009 en el Observatorio del Aeropuerto de Málaga (AEMET).

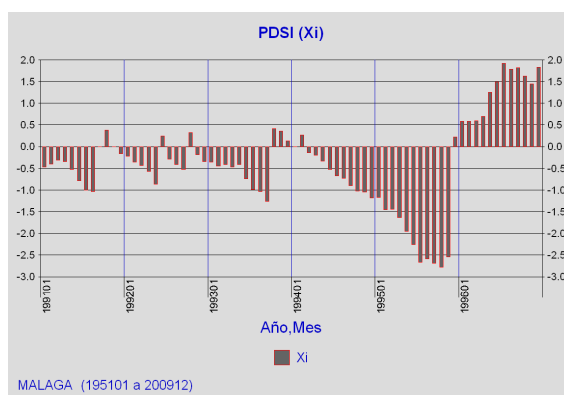


Fig. 14.- Comportamiento del Índice de Palmer (PDSI) en la sequía 1991 a 1995 en el Observatorio del Aeropuerto de Málaga (AEMET).

Validación del Índice de Palmer frente al ISP e IESP

Para validar el uso del Índice de Palmer en el análisis de la sequía en Andalucía se comparan los resultados anteriores obtenidos para el Observatorio del Aeropuerto de Sevilla con otros índices que ya se han aplicado en la zona, concretamente con el Índice de Sequía Estandarizado para 6, 12 18 y 24 meses (ISP6, ISP12, ISP18 e ISP24) y con el Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica (IESP) (Pita M.F, 2001 a y b).

Índice	Número de Secuencias
SPI6	121
SPI12	74
SPI18	56
SPI24	44
IESP (mediana)	173
IESP (media)	12
PDSI	47

Tabla 5.- Número de Secuencias secas y húmedas según diferentes Indicadores de Sequía calculados en el Aeropuerto de Sevilla (AEMET) durante el periodo 1951-2009.

El periodo 1951 a 2009, el ISP lo divide en un número de secuencias (secas y húmedas) que va desde las 44 secuencias para el ISP24 hasta las 121 secuencias del ISP a 6 meses, lo cual es lo esperado pues este último tiene menos memoria que los anteriores, olvidando rápidamente el comportamiento de la precipitación en los meses anteriores. El PDSI con 47 secuencias se sitúa entre ellos, integrando así las características de los índices con mayor y menor memoria, permitiendo caracterizar de forma conjunta las secuencias cortas y largas.

El IESP divide el periodo 1951-2009 en una gran cantidad de secuencias, muy distante de los demás, sobre todo del PDSI. La razón es que el IESP trabaja con la mediana de la serie como referencia para los desvíos pluviométricos anuales y al ser la precipitación una variable meteorológica poco simétrica, la mediana es superior a la media, con lo que aumentarán los desvíos negativos, facilitando la ruptura de las secuencias. Además en el IESP la diferencia en el número de secuencias se incrementa cuando aumenta con el tamaño de la serie.

Sequía 2004-2009 en Sevilla

En la sequía 2004 a 2009 ya vimos como el PDSI señalaba su comienzo en agosto, debido a las pérdidas de agua en el suelo por evapotranspiración causada por las altas temperaturas veraniegas. Los índices pluviométricos ISP e IESP, retrasan evidentemente el comienzo de la sequía a noviembre cuando comienza a acumularse el déficit pluviométrico. Esta sequía 2004-2009 tiene otra singularidad, el año agrícola 2006-2007 equilibra el balance pluviométrico, así lo indican los índices SPI6 y IESP, que rompen la secuencia seca de forma transitoria en agosto y noviembre de 2006, respectivamente. En este caso tiene mejor comportamiento el PDSI, que, considerando que aún no están satisfechas las necesidades de precipitación CAFEC del suelo continúa considerando el periodo como seco.

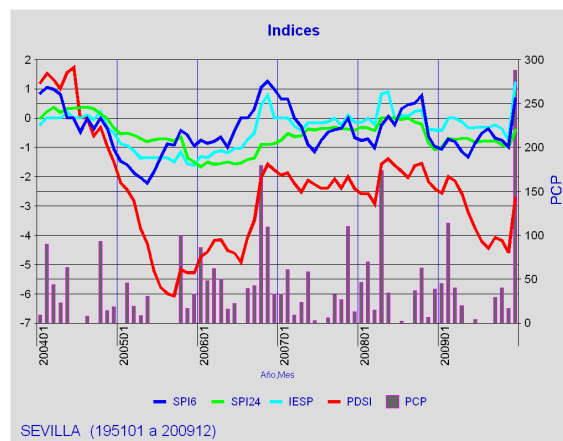


Fig. 15.- Comparación del Índice de Palmer (PDSI) frente al SPI a 6 y 24 meses y IESP en la sequía 2004 a 2009 en el Observatorio del Aeropuerto de Sevilla (AEMET).

SPI6		SPI24		IESP	
Inicio	L	Inicio	L	Inicio	L
200407	-1	200412	-40	200401	-1
200408	1	200804	5	200402	9
200409	-23	200809	-4	200411	-23
200608	8			200610	5
200704	-7			200703	-5
200711	1			200708	2
200712	-5			200710	-1
200805	1			200711	1
200806	-1			200712	-1
200807	4			200801	2
200811	-2			200803	-1
				200804	7
				200811	-2
				200901	

Tabla 6.- Comportamiento de los Indicadores de Sequía: SPI a 6 y 24 meses, IESP para la secuencia seca de agosto de 2004 a diciembre de 2009 (53 meses) determinada por el Índice de Palmer en el observatorio del Aeropuerto de Sevilla. Las columnas indican la fecha en año y mes (Inicio) y la Longitud (L) de la secuencia, siendo negativo para secuencias secas y positivo para las húmedas.

Sequía 1991-1995 en Sevilla

En el segundo episodio seco analizado, noviembre de 1991 a octubre de 1995, de menor duración pero de mayor intensidad, aunque no se presentan todos en la tabla, los índices pensados para sequías medias y largas, SPI12, SPI18, SPI 24 y PDSI consideran una sola secuencia de similar duración (50, 50, 52 y 48, respectivamente) y todos comienzan en noviembre de 1991, salvo el SPI24, que aún contiene en su memoria las precipitaciones de finales de 1998. El ISP6 de poca memoria pluviométrica muestra algunas rupturas de corta duración debido a los 70.6 mm recogidos en junio de 1996. El IESP, debido a la mayor sensibilidad en los desvíos pluviométricos, por considerar la mediana

como referente, rompe la secuencia, coincidiendo con los 92.7 mm recogidos en octubre de 1992.

SPI6		SPI24		IESP	
Inicio	L	Inicio	L	Inicio	L
199112	-8	199201	-52	199111	-11
199208	1	199605	1	199210	1
199209	-1			199211	-38
199210	1			199601	1
199211	-37				
199512	8				

Tabla 7.- Comportamiento de los Indicadores de Sequía: SPI a 6 y 24 meses, IESP para la secuencia seca de noviembre de 1991 a octubre de 1995 (48 meses) determinada por el Índice de Palmer en el observatorio del Aeropuerto de Sevilla. Las columnas indican la fecha en año y mes (Inicio) y la longitud (L) de la secuencia, siendo negativo para secuencias secas y positivo para las húmedas.

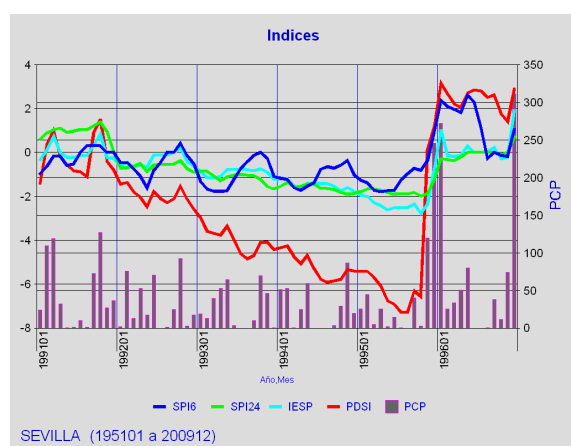


Fig. 16.- Comparación del Índice de Palmer (PDSI) frente al SPI a 6 y 24 meses y IESP en la sequía 1991 a 1995 en el Observatorio del Aeropuerto de Sevilla (AEMET).

Conclusiones

El Índice de Palmer ofrece resultados muy satisfactorios en el análisis de las sequías en Andalucía.

El Índice de Palmer tiene una gran consistencia espacial, permitiendo comparar los resultados obtenidos para diferentes entornos geográficos (campiña, litoral y sierra). La ruptura de la serie de 2004-2009 en cuatro ocasiones en la sierra, frente a ninguna en los casos de campiña y litoral, obedece a que en el periodo 2004-2009 ha habido lluvias ocasionales importantes que han roto la serie en la sierra, donde además los frentes por latitud son más activos. La ruptura de esta sequía la reflejan también los índice ISP e IESP, que son muy sensible a las precipitaciones registradas, pues son netamente pluviométricos.

La validación del PDSI frente a otros índices pluviométricos, como SPI revelan a favor de PDSI que éste caracteriza igualmente las sequías cortas, medias y largas. ES decir, con un solo índice integramos la información de los cuatro SPE6, SPI12, SPI18 y SPI24.

La validación del PDSI frente al IESP señala que el Índice de Palmer no introduce tanto ruido como el IESP, que incorpora excesivas interrupciones en las secuencias, al ser excesivamente sensible a la precipitación registrada que se compara con la mediana.

El PDSI frente a los SPI e IESP permite incorporar el factor suelo, declarando el comienzo de la sequía en agosto de 2004 debido a la elevada evapotranspiración, mientras que los demás lo retrasan al periodo de precipitaciones, al depender solo de las lluvias.

El PDSI frente a los SPI e IESP al permitir incorporar el suelo, no realiza falsas salidas de la sequía, generalmente de un mes de duración. Esto tiene una repercusión muy relevante en el establecimiento de un Sistema de Alerta Temprana (SAT).

Referencias

ALLEY, W. M., (1984): The Palmer Drought Severity Index: Limitations and assumptions. *J. Climate Appl. Meteor.*, **23**, 1100–1109.

GARCÍA BARRÓN, L. (2001): Analyse de la Sécheresse Dans Les Climats Méditerranéens. Climat Et Environnement: L Information Climatique Au Service de la Gestion de L Environnement. *Colloque Internationale de Climatologie*. Num. 14. Sevilla, España. Pag. 115-116. ISBN: 84-699-5649-3

GUTTMAN, N. B., (1991): A sensitivity analysis of the Palmer Hydrologic Drought Index. *Water Resour. Bull.*, **27**, 797–807.

—, 1998: Comparing the Palmer Drought Index and the Standardized Precipitation Index. *J. Amer. Water Resour. Assoc.*, **34**, 113– 121.

—, J. R. WALLIS, AND J. R. M. HOSKING, (1992): Spatial comparability of the Palmer Drought Severity Index. *Water Resour. Bull.*, **28**, 1111–1119.

HEIM JR., RICHARD R. (2002): A Review of Twentieth-Century Drought Indices Used in the United States. American Meteorological Society.

MCKEE, T. B., N. J. DOESKIN, AND J. KLEIST, (1993): The relationship of drought frequency and duration to time scales. Preprints, *Eighth Conf. on*

Applied Climatology, Anaheim, CA, Amer. Meteor. Soc., 179–184.

PALMER, W.C. (1965). Meteorological Drought. Res. Paper No. 45. U.S. Dept. of Commerce, Washington D.C. 58 pages.

PATEL, N. R., CHOPRA, P., DADHWAL, V. K. (December 2007): Analyzing spatial patterns of meteorological drought using standardized precipitation index. *Meteorological Applications*. Volume 14, Issue 4, Pages: 329-336

PITA, M.F. (2001)a: “Sequías en la cuenca del Guadalquivir”, en “*Causas y consecuencias de las sequías en España*”, Alicante, Instituto Universitario de Geografía de la Universidad de Alicante y Caja de Ahorros del Mediterráneo, pp 303-343

——, (2001)b: “Un nouvel indice de sécheresse pour les domaines méditerranéens. Application au bassin du Gouadalquivir (sudouest de l’Espagne)”, *Publications de l’Association Internationale de Climatología*, vol. 13, Nice.

——, (1995): Las sequías. Análisis y tratamiento, Sevilla, Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía.

TRNKA, M., DUBROVSKÝ, M., SVOBODA, M., SEMERÁDOVÁ, D., HAYES, M., WILHITE, D. (May 2009): Developing a regional drought climatology for the Czech Republic. *International Journal of Climatology*. Volume 29, Issue 6, Pages: 863-883

WELLS, N., (2002): Development of the self-calibrating Palmer Drought Severity Index. B.S. Honors thesis, University of Nebraska—Lincoln, 143 pp.